

technique et forêt

INFLUENCE D'UNE FERTILISATION MINÉRALE SUR LA CROISSANCE RADIALE DE SAPINIÈRES DÉPÉRISSENTES DANS LES VOSGES

F. LEBOURGEOIS - M. BECKER - M. BONNEAU

Depuis le début des années 1980, le problème du « dépérissement des forêts » a suscité en Europe de très nombreux travaux de recherche, dont certains ont mis en évidence une relation entre les symptômes alarmants observés et des carences calci-magnésiennes (Zech et Popp, 1983 ; Zöttl et Mies, 1983 ; Kraus *et al.*, 1987). Dans les Vosges (Nord-Est de la France), ce sont les travaux de Landmann *et al.* (1987, 1988) qui, dès 1984, ont révélé une forte corrélation négative entre l'intensité du dépérissement, dont les principaux symptômes apparents sont la chute prématurée et/ou le jaunissement des aiguilles, et les teneurs en calcium et magnésium des aiguilles de Sapin et d'Épicéa.

Afin de vérifier expérimentalement l'hypothèse selon laquelle une mauvaise alimentation minérale pouvait intervenir dans la dégradation de l'état sanitaire des sapinières vosgiennes, divers essais de fertilisation ont été mis en place au printemps 1985 sur différents sites des Vosges lorraines et alsaciennes caractérisés par des degrés divers de dépérissement (Bonneau, 1988). L'analyse des premiers résultats a fait ressortir des comportements variés des peuplements traités vis-à-vis de la fertilisation, comportements fondés sur les variations de défoliation et de jaunissement enregistrées au cours de la période 1986-1988 (Bonneau et Landmann, 1989).

C'est la diversité des réactions observées en 1988, et la difficulté à leur trouver des explications certaines, qui ont suscité l'étude rapportée ici. Celle-ci a pour objet l'analyse rétrospective du comportement des peuplements correspondants par une approche dendroécologique, c'est-à-dire associant étude phytoécologique des conditions de croissance et étude dendrochronologique basée sur la mesure des accroissements radiaux annuels. Plus précisément, il s'agissait de quantifier l'effet des traitements sur la croissance radiale et ses éventuelles variations inter-

annuelles, de juger de la cohérence des résultats ainsi obtenus avec les observations symptomatiques rapportées précédemment, et de mettre en évidence les éventuels paramètres individuels (liés à la concurrence) ou stationnels (conditions édaphiques) susceptibles d'expliquer la diversité des réactions observées.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les dispositifs expérimentaux

Il convenait tout d'abord de faire un choix parmi les divers essais de fertilisation mis en place en 1985, tant sur Sapin que sur Épicéa. Ce choix a porté exclusivement sur le Sapin, afin de bénéficier de la référence dendrochronologique déjà disponible pour cette espèce sur l'ensemble du Massif vosgien (Becker, 1987). Au total, quatre dispositifs ont été retenus, chacun représentatif de l'un des comportements symptomatiques observés : deux sur le versant lorrain des Vosges, dans les forêts domaniales de Vologne et de Mortagne, et deux sur le versant alsacien, dans les forêts communales de Grendelbruch et de Russ. Les comportements observés, après l'apport d'éléments fertilisants en 1985, étaient en moyenne les suivants :

- Vologne : dégradation des arbres témoins et rétablissement des arbres fertilisés ;
- Mortagne : dégradation des témoins et réaction variable des fertilisés (dégradation, stabilité ou rétablissement) ;
- Grendelbruch : rétablissement comparable des témoins et des fertilisés ;
- Russ : rétablissement satisfaisant des témoins et plus affirmé des fertilisés.

Chaque site comporte dix placettes (cinq traitements, deux répétitions) de 25 arbres chacune. Chaque placette traitée a une superficie de 2 500 m² (50 × 50 m), et comporte une zone d'observations et de mesures (30 × 30 m) entourée d'une bande d'isolement de 10 m de large.

Les cinq traitements ont été identiques pour tous les essais et ont porté sur le calcium, le magnésium, le potassium, le phosphore et l'azote. L'apport de calcium avait essentiellement pour but de diminuer l'acidité du sol et sa teneur en aluminium échangeable. Les cinq traitements appliqués sont, en valeurs rapportées à l'hectare :

- Témoin T : aucun apport d'engrais ;
- Ca : 2 500 kg de calcaire broyé (« Recalcit ») et 400 kg de chaux vive. Ce traitement apporte au total 1 520 kg de CaO, dont 400 sous forme rapidement soluble ;
- CaMg : 2 500 kg de « Recalcit magnésien » à 12 % de MgO, mélange de calcaire broyé et de chaux magnésienne, et 400 kg de chaux magnésienne vive ; soit 590 kg de CaO sous forme rapidement soluble, 1 000 kg de CaO sous forme peu soluble et 450 kg de MgO sous forme soluble ;
- K Mg : 500 kg de « Kalimagnesia » (appelé aussi « Patentkali »), sulfate double de K et de Mg ;
- NPKCaMg : apport de Ca et de Mg identique à celui du traitement CaMg, plus 200 kg de N (sous forme d'ammonitrate à 34,5 %), 200 kg de P₂O₅ (sous forme de superphosphate triple) et 150 kg de K₂O (sous forme de sulfate de potassium).

Les observations phytoécologiques

Elles comportent, sur chacun des 40 placeaux élémentaires, un relevé de végétation complet ainsi que les observations stationnelles habituelles : altitude, position topographique, pente,

Technique et forêt

exposition, type d'humus, roche-mère, description sommaire du sol. De plus, lors de la mise en place de l'expérience en 1985, des analyses foliaires ainsi que des analyses chimiques sur les horizons A₁ et B des sols de chaque site ont été effectuées (tableaux I et II, ci-dessous).

Tableau I Composition des aiguilles au début de l'expérimentation, perte moyenne d'aiguilles (It %), pourcentage d'arbres ayant une note de jaunissement supérieure ou égale à 1 (J %) (modifié d'après Bonneau, 1991)

Dispositif	Roche-mère	Composition foliaire en 1985 (en % de matière sèche)					It (%)	J (%)
		N	P	K	Ca	Mg		
VOLOGNE	Grès permien	1,23	0,15	0,68	0,18	0,06	37	16
MORTAGNE	Grès intermédiaire et Grès vosgien	1,35	0,11	0,75	0,31	0,07	25	10
RUSS	Granite acide de Kagenfels	1,26	0,16	0,43	0,31	0,12	23	22
GREDELBRUCH	Granite acide de Kagenfels	1,33	0,14	0,67	0,28	0,06	26	35

Seuil de carence | 1 à 1,3 | 0,1 à 0,15 | 0,3 à 0,4 | 0,05 à 0,1 | 0,06
Teneur optimale | 1,5 à 1,9 | 0,19 à 0,25 | 0,6 à 0,8 | 0,3 à 0,5 | 0,1 à 0,14

Tableau II Caractéristiques des horizons A₁ et B de chaque site en 1985 (en méq/100 g de terre fine) (d'après Bonneau, 1991)

VOLOGNE								
Horizon	pH H ₂ O	T	Mg	Ca	K	Al	Mg/Al	Ca/Al
A ₁	4	7	0,09	0,18	0,25	5,8	0,01	0,03
B	4,4	5	0,03	0,09	0,14	3,8	0,01	0,02

MORTAGNE								
Horizon	pH H ₂ O	T	Mg	Ca	K	Al	Mg/Al	Ca/Al
A ₁	3,9	6	0,07	0,1	0,12	4,8	0,01	0,02
B	4,3	6	0,02	0,07	0,1	4,3	0,01	0,02

GREDELBRUCH								
Horizon	pH H ₂ O	T	Mg	Ca	K	Al	Mg/Al	Ca/Al
A ₁	3,6	26	0,16	0,6	0,18	7	0,02	0,08
B	4,4	12	0,04	0,1	0,09	5,5	0,01	0,02

RUSS								
Horizon	pH H ₂ O	T	Mg	Ca	K	Al	Mg/Al	Ca/Al
A ₁	3,9	18	0,21	0,7	0,19	5,6	0,04	0,12
B	4,4	9	0,05	0,1	0,07	3,7	0,01	0,02

Les données floristiques (40 relevés, 128 espèces) ont été soumises à une analyse multivariable (l'analyse factorielle des correspondances), dont l'interprétation a permis d'affecter à chaque placette un indice floristique de nutrition minérale (If) (Lebourgeois, 1991). Cette analyse a en outre permis de constater que, sur la période 1985-1990, les changements de végétation consécutifs aux apports d'éléments minéraux étaient encore peu marqués quantitativement, mais que la composition floristique avait notablement évolué (Picard *et al.*, 1993). Par ailleurs, dans les placettes chaulées (Ca seul ou combiné à d'autres éléments), on a noté une amélioration de l'activité biologique de l'humus, qui a évolué du moder initial vers le mull-moder ou le mull acide. De telles modifications suite à un amendement calcique ont déjà été mises en évidence, aussi bien en hêtraie (Toutain *et al.*, 1987, 1988) qu'en sapinière (Becker *et al.*, 1992).

Les observations et mesures sur les arbres

L'ensemble du dispositif comprend 906 sapins adultes (âge moyen : 99 ans). Sur chacun d'eux ont été notés :

- le statut social, selon que l'arbre était dominant (Do), codominant (Co) ou dominé (Dé) ;
- l'état sanitaire en 1986 et 1990, exprimé en pourcentage d'aiguilles supposées manquantes par rapport à la quantité que l'arbre devrait posséder s'il était parfaitement sain. Ce critère d'appréciation visuelle de l'état sanitaire a été noté It (= indice de transparence du houppier). Les notations de 1986 ont été considérées comme données initiales, car il est peu probable que les traitements aient déjà eu le temps de s'exprimer de façon sensible sur la masse foliaire.

Pour l'étude dendrochronologique, chacun des 906 arbres a été carotté jusqu'à la moelle, à 1,30 m du sol, avec une tarière de Pressler de 5 mm de diamètre intérieur. Sur chaque carotte, préalablement planée au rasoir pour mieux révéler les cernes, les accroissements annuels ont été mesurés avec précision (1/100 mm) à l'aide d'un système vidéo-informatisé. Étant donné les buts de l'étude, seuls les 51 derniers cernes ont été mesurés (période 1940-1990), mais le comptage est allé jusqu'à la moelle de façon à connaître l'âge courant (ou âge cambial) des cernes mesurés.

La parfaite synchronisation des dendrochronogrammes ainsi obtenus a ensuite été vérifiée en s'aidant de la courbe de « référence » précédemment établie pour le Sapin dans les Vosges (Becker, 1987). Cette étape a été fortement compliquée par de très nombreux « cernes manquants » : près de 50 % des arbres en comportaient au moins 1 et 14 % plus de 10... Cette fréquence importante est naturellement en relation avec le caractère déperissant des sites choisis.

Afin de pouvoir s'abstraire avec objectivité de l'effet de l'âge courant des cernes (= âge qu'avait l'arbre lors de leur élaboration) sur leur largeur, chaque donnée a été ensuite « standardisée », c'est-à-dire transformée en un indice de croissance Ic, qui est le rapport (exprimé en %) de la largeur mesurée sur la largeur moyenne observée pour le Sapin à cet âge dans les Vosges (Becker, 1989). De plus, afin que les effets spécifiques de la fertilisation soient plus faciles à observer et à quantifier, chaque courbe moyenne relative à un traitement a été réajustée de manière à l'amener globalement au niveau de la courbe du témoin correspondant pendant les quinze années précédant la fertilisation (1970-1984). Ceci permet de corriger les inévitables petites différences de croissance moyenne des arbres des divers blocs avant l'application des traitements.

Enfin, pour étudier les effets des divers paramètres pris en compte (type de fertilisation, statut social, indice de transparence du houppier...) sur la croissance radiale, l'échantillon initial (906 sapins) a pu être à volonté « stratifié » en divers sous-ensembles selon la valeur prise par un ou plusieurs de ces paramètres, et les courbes moyennes correspondantes ont été calculées.

RÉSULTATS

Comportement des peuplements non fertilisés

La figure 1 (ci-dessous) montre l'évolution de l'accroissement radial depuis 1940 dans les placettes témoins des divers sites expérimentaux. On constate que, depuis le début des années 1980, après une phase de dépression remontant au début des années 1970, voire des années 1960 à Vologne, l'accroissement des sapins a augmenté très fortement et atteint en 1990 des niveaux jamais observés (sauf à Vologne). Cette reprise spontanée des témoins coïncide avec le retour d'années climatiquement plus favorables, notamment sur le plan de la pluviométrie. Quant à la variabilité de reprise observée selon le site, les observations faites sur le terrain ont montré qu'elle est en grande partie à relier aux différences de conditions édaphiques : profondeur de sol et réserve utile en eau, richesse minérale (Lebourgeois, 1991).

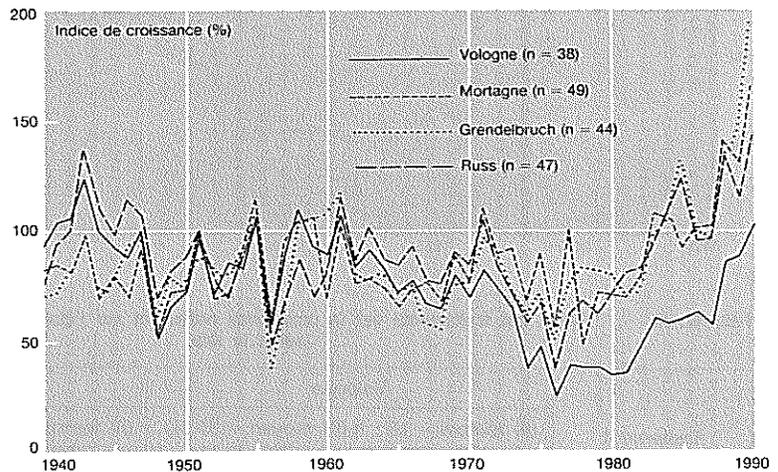


Figure 1
**INDICE DE CROISSANCE
 RADIALE DES SAPINS NON
 FERTILISÉS SELON LE SITE**
 (n = nombre d'arbres
 disponibles)

Pour expliquer ce regain considérable de croissance, déjà observé à l'échelle de l'ensemble du Massif vosgien (Becker, 1989), on ne peut toutefois pas exclure l'intervention d'autres facteurs dont les variations à long terme commencent à s'exprimer clairement sur les peuplements forestiers, en particulier l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique (Neftel *et al.*, 1985 ; Keeling, 1986) et les dépôts azotés (Probst *et al.*, 1990).

C'est dans ce contexte de rétablissement général de la croissance des sapinières, sinon de leur « santé », que les effets de la fertilisation vont être analysés.

Effet moyen des traitements

● Sur l'ensemble des sites

En moyenne, observé sur l'ensemble des dispositifs (figure 2, p. 644), l'apport d'éléments fertilisants a eu des répercussions importantes sur l'accroissement radial des arbres, avec des gains très substantiels par rapport aux sapins non traités.

C'est le traitement complet NPKCaMg qui occasionne le gain le plus élevé : + 37 % au cours de la période 1985-1990 par rapport à la période 1970-1984. Son effet est significatif (au seuil de 5 %) dès la seconde saison de végétation suivant la fertilisation (1986). L'azote est très probablement responsable de la réponse plus rapide à ce traitement.

Les autres traitements donnent des résultats globalement comparables : CaMg (+ 24 %), Ca (+ 23 %), et KMg (+ 22 %). Ils deviennent significatifs (au seuil de 5 %) à partir de 1987 pour Ca et KMg et de 1988 pour CaMg. Ils ne diffèrent significativement du traitement complet qu'au seuil de 10 % et pour certaines années seulement.

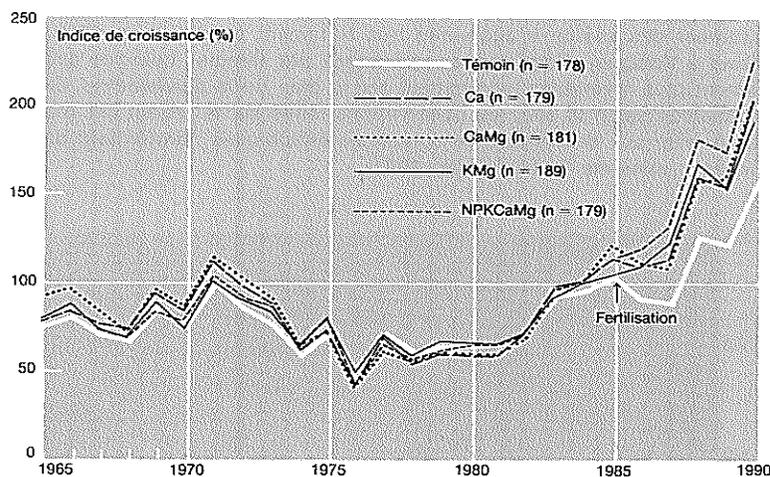


Figure 2
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS SUR
L'ENSEMBLE DES SITES
SELON LE TRAITEMENT
(n = nombre d'arbres
disponibles)

Tableau III Effets des traitements sur la croissance radiale et sur l'état des houppiers selon le site

Traitement	Vologne			Mortagne		
	(Ifl témoin = 12 ; It 86 moyen = 37 %)			(Ifl témoin = 8,8 ; It 86 moyen = 25 %)		
	Croissance radiale	Etat des houppiers	Eff.	Croissance radiale	Etat des houppiers	Eff.
Ca	NS	***	48	++	***	50
CaMg	NS	***	48	NS	NS	50
KMg	NS	***	45	NS	***	50
NPKCaMg	NS	***	35	++	***	48

Traitement	Grendelbruch			Russ		
	(Ifl témoin = 23 ; It 86 moyen = 26 %)			(Ifl témoin = 63 ; It 86 moyen = 23 %)		
	Croissance radiale	Etat des houppiers	Eff.	Croissance radiale	Etat des houppiers	Eff.
Ca	+	***	34	NS	NS	47
CaMg	NS	NS	35	NS	NS	48
KMg	+++	NS	50	++	NS	44
NPKCaMg	++	NS	49	++	NS	47

+++ : significatif à partir de 1986 (seuil de 5 %).
++ : significatif à partir de 1987 (seuil de 5 %).
+ : significatif à partir de 1988 (seuil de 5 %).

NS : non significatif à 5 %.
*** : significatif au seuil de 5 %.

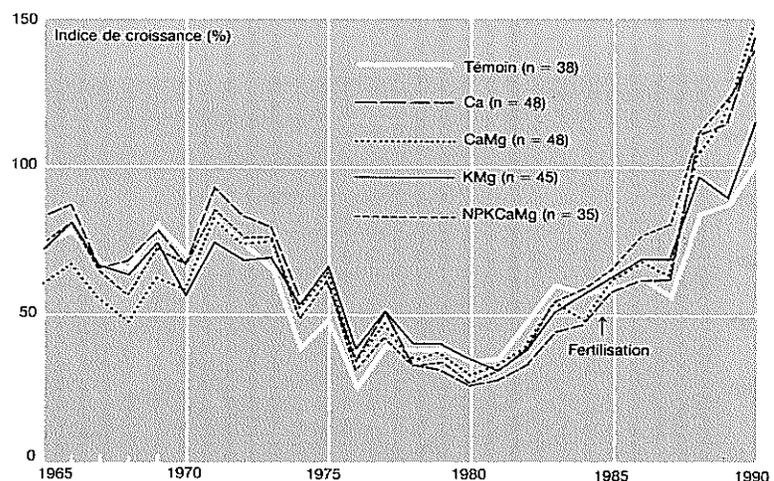
Technique et forêt

Il apparaît donc que les apports minéraux sans azote donnent des résultats comparables, sans que l'on puisse distinguer clairement l'effet respectif du calcium, du potassium et du magnésium, et que l'effet de l'azote s'additionne aux effets des autres éléments en permettant un gain de croissance radiale plus important et une réponse plus rapide au traitement.

• Sur chaque site

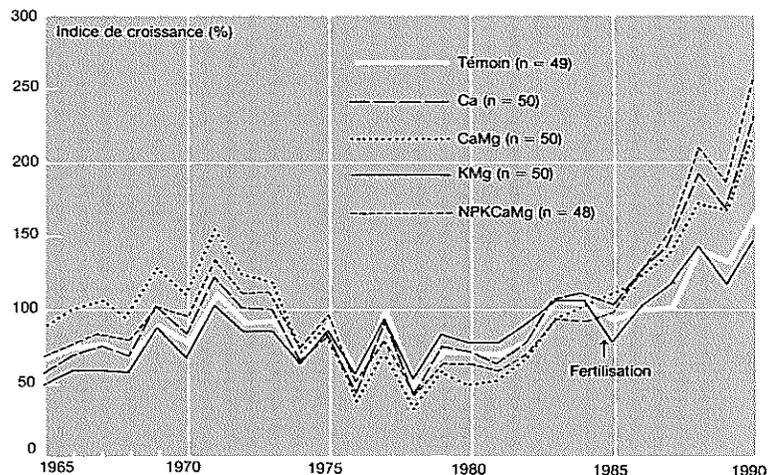
Les résultats de l'analyse site par site sont présentés dans le tableau III (p. 644). Sur le dispositif de Vologne, caractérisé par la défoliation moyenne la plus élevée en 1986 (It 86 = 37 %) et par un indice floristique de nutrition minérale initiale bas (IfI = 12), seuls les traitements Ca et CaMg semblent avoir un effet à partir de 1990 sur la croissance radiale, mais aux seuils de 10 % et 20 % seulement (figure 3, ci-contre). Par contre, tous les traitements améliorent nettement l'état sanitaire des arbres (seuil de 5 %).

Figure 3
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS À
VOLOGNE SELON LE
TRAITEMENT (n = nombre
d'arbres disponibles)



Sur le site de Mortagne, également caractérisé par un indice floristique de nutrition minérale faible (IfI = 8,8), seuls les traitements NPKCaMg et Ca sont significatifs (au seuil de 5 %) à partir de 1987 sur la croissance radiale avec des gains respectifs de + 42 % et + 33 % (figure 4, ci-contre).

Figure 4
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS À
MORTAGNE SELON LE
TRAITEMENT (n = nombre
d'arbres disponibles)



Sur la refoliation, tous les traitements, sauf CaMg, sont significatifs (seuil de 5 %).

Pour le dispositif de Grendelbruch, dont l'indice de nutrition minérale est plus élevé (IfI = 23), tous les traitements, sauf CaMg, sont significatifs (au seuil de 5 %) sur la croissance radiale : KMg est significatif dès 1986 avec un gain de + 55 %, NPKCaMg à partir de 1987 avec un gain de + 45 % et Ca à partir de 1988 avec un gain de + 48 % (figure 5, ci-dessous). En ce qui concerne l'amélioration de la masse foliaire, seul le traitement Ca donne un résultat significatif.

Pour le dispositif de Russ, caractérisé par l'indice de nutrition minérale le plus élevé (IfI = 63), les traitements n'ont pas d'effet significatif sur l'amélioration de la masse foliaire et peu sur la croissance radiale. En effet, seuls les traitements KMg et NPKCaMg sont significatifs (au seuil de 5 %) pour certaines années seulement (figure 6, ci-dessous).

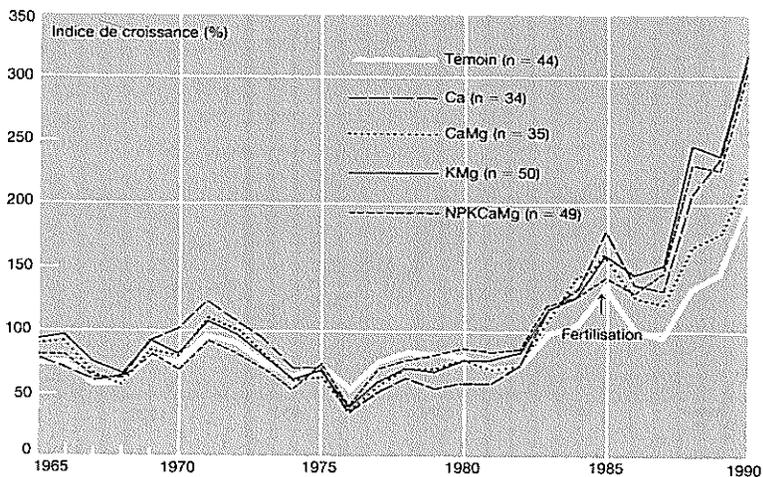


Figure 5
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS À
GREDELBRUCH SELON LE
TRAITEMENT (n = nombre
d'arbres disponibles)

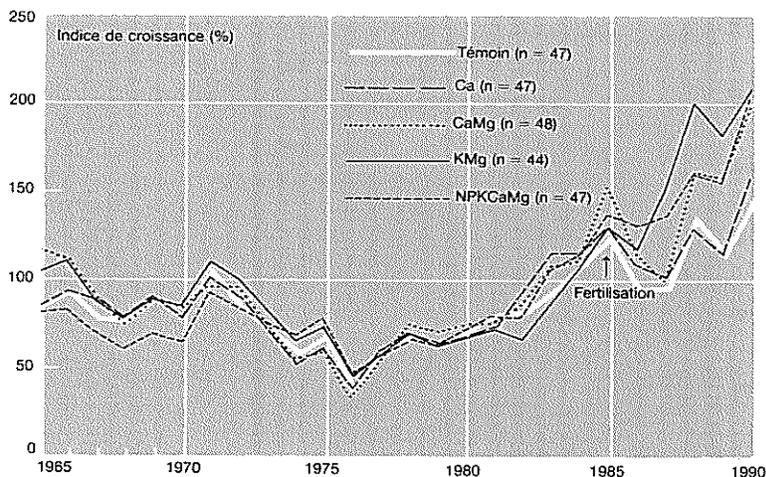


Figure 6
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS À
RUSS SELON LE
TRAITEMENT (n = nombre
d'arbres disponibles)

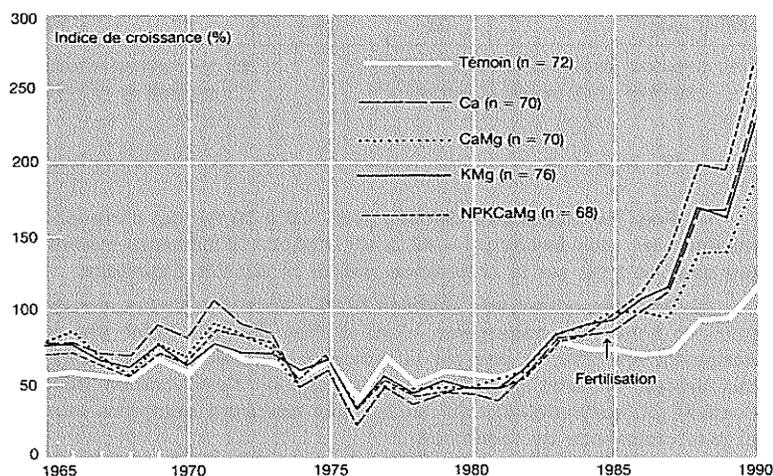
Technique et forêt

Sur les deux stations initialement les plus pauvres, et dans le cas de Vologne très fortement défolié en 1986, l'apport d'éléments minéraux a un effet marqué sur la restauration de la masse foliaire, mais des effets beaucoup moins nets sur l'accroissement radial. À l'opposé, sur les dispositifs les plus fertiles initialement (Grendelbruch et Russ), ces mêmes apports n'ont que peu d'effet sur l'état sanitaire, mais améliorent plus nettement la croissance radiale. Ces deux types de comportements laissent donc penser que les défoliations observées en 1986 n'étaient pas partout équivalentes et correspondaient, en partie tout du moins, à des causes différentes. Sur les sols les plus pauvres, les pertes foliaires observées au début des années 1980 seraient principalement la conséquence de carences nutritionnelles graves, tandis que, sur les stations les plus riches, elles seraient essentiellement l'expression de l'ajustement « normal » des arbres face principalement à de mauvaises conditions pluviométriques.

Interaction du statut social

La compétition subie par un arbre module clairement sa réponse aux apports minéraux. Pratiquement, seuls les arbres codominants ($n = 356$) et dominants ($n = 476$) ont réagi significativement aux traitements. Pour les codominants, tous les traitements sont significatifs (au seuil de 5 %) dès 1986 avec des gains de croissance notables par rapport aux témoins : + 96 % pour NPKCaMg ; + 70 % pour KMg ; + 68 % pour Ca, + 46 % pour CaMg (figure 7, ci-dessous). Pour les dominants, seul le traitement NPKCaMg est significatif (au seuil de 10 %) à partir de 1987. Les autres traitements ne sont significatifs qu'aux seuils de 10 ou 20 % et pour certaines années seulement.

Figure 7
INDICE DE CROISSANCE
RADIALE DES SAPINS
CODOMINANTS SUR
L'ENSEMBLE DES SITES
SELON LE TRAITEMENT
($n =$ nombre d'arbres
disponibles)



On est donc amené à conclure que la fertilisation, qui profite seulement aux arbres peu ou pas concurrencés, tend à accélérer le processus de différenciation sociale au sein des peuplements.

Interaction de l'état sanitaire

Nos observations permettent de mettre en évidence une relation entre indice de transparence du houppier en 1986 (It 86), indice floristique de nutrition minérale (Ifi) et croissance radiale (tableau IV, p. 648).

Tableau IV Effets des traitements sur la croissance radiale et sur l'état des houppiers selon l'indice de transparence du houppier en 1986 (It 86)

	It 86 = 0 à 10 % (IfI = [42 à 47] n = 55)			It86 = 15 à 30 % (IfI = [29 à 42] n = 638)		
	Effectif	Croissance radiale	État du houppier	Effectif	Croissance radiale	État du houppier
T	22	/	/	115	/	/
Ca	7	NS	NS	119	NS	NS
CaMg	8	NS	NS	132	NS	NS
KMg	12	NS	NS	137	++	NS
NPKCaMg	6	NS	NS	135	+++	NS

	It 86 = 35 à 40 % (IfI = [19 à 34] n = 145)			It86 = 45 à 100 % (IfI = [13 à 24] n = 68)		
	Effectif	Croissance radiale	État du houppier	Effectif	Croissance radiale	État du houppier
T	23	/	/	18	/	/
Ca	37	++	***	16	NS	***
CaMg	25	++	NS	16	NS	***
KMg	32	NS	***	8	NS	***
NPKCaMg	28	+++	***	10	NS	***

+++ : significatif dès 1986 au seuil de 5 %

NS : non significatif au seuil de 5 %

++ : significatif à partir de 1987 au seuil de 5 %

*** : significatif au seuil de 5 %.

— Pour les arbres peu défoliés (It 86 = 0 à 10 %), qui correspondent aux indices de nutrition minérale les plus élevés (IfI = 42 à 47), l'apport d'éléments minéraux n'a pas d'effet significatif (au seuil de 5 %) sur la croissance radiale ni sur l'état sanitaire.

— Pour les arbres très défoliés (It 86 ≥ 45 %), associés aux indices de fertilité les plus bas (IfI = 13 à 24), les traitements n'ont d'effet que sur l'état des houppiers qui s'améliore très nettement en 1990, et pas sur la croissance radiale. On peut cependant espérer à terme, pour ces arbres, un effet positif de la fertilisation : l'amélioration de la masse foliaire et celle de l'activité photosynthétique qui en découle devraient permettre aux réserves de se reconstituer, et à la croissance de redémarrer.

— Pour les arbres de la classe de défoliation « 15 à 30 % », dont les conditions minérales de croissance sont correctes (IfI = 29 à 42), l'amélioration de l'état sanitaire est indépendant des apports minéraux, et seuls les traitements NPKCaMg et KMg permettent des accroissements radiaux significativement supérieurs (au seuil de 5 %) à celui des témoins. Le traitement complet a un effet dès la deuxième saison de végétation suivant la fertilisation (1986), grâce vraisemblablement à l'azote qu'il comprend, tandis que l'effet du traitement KMg ne s'exprime qu'à partir de 1987.

— Pour les arbres de la classe de défoliation « 35 à 40 % », dont les indices de fertilité sont plus faibles (IfI = 19 à 34), la restauration des houppiers observée en 1990 est en partie liée aux traitements Ca, KMg, et NPKCaMg. Par contre, seuls les traitements comportant du calcium ont un effet très positif sur la croissance radiale : + 137 % pour NPKCaMg ; + 89 % pour Ca ;

Technique et forêt

+ 80 % pour CaMg. Comme précédemment, l'apport complémentaire d'azote permet un effet dès la deuxième saison de végétation suivant la fertilisation (1986). L'effet du calcium, seul ou associé au magnésium, ne s'exprime qu'à partir de 1987.

Il apparaît donc que, selon le degré de transparence du houppier en 1986, le comportement des sapins vis-à-vis des apports minéraux est différent. Parallèlement à une amélioration spontanée de l'état sanitaire général, c'est seulement pour les sapins très défoliés (> 30 %) correspondant aux indices de nutrition minérale les plus bas, que la fertilisation a un effet bénéfique complémentaire manifeste sur l'état sanitaire. Jusqu'à 30 %, les déficits de masse foliaire observés ne seraient donc pas ou peu en relation avec des problèmes nutritionnels.

CONCLUSIONS ET DISCUSSION

Au total, ces essais de fertilisation montrent que sur les sols acides et très désaturés des stations vosgiennes étudiées, un apport d'éléments minéraux permet d'améliorer notablement et durablement la croissance radiale des sapins adultes. L'azote permet une réponse rapide des peuplements, et l'apport simultané de tous les éléments majeurs l'accroissement radial le plus fort. L'apport de calcium seul donne des résultats comparables (au seuil de 5 %) à ceux des combinaisons calcium-magnésium et magnésium-potassium.

Il convient de tenir compte également du statut social de l'arbre. Dans notre étude, seuls les « non-dominés » ont réagi significativement à un apport d'éléments minéraux. La fertilisation a donc pour effet d'accélérer la différenciation sociale au sein des peuplements. L'importance de la prise en compte du statut social dans l'analyse des effets d'une fertilisation avait déjà été mise en évidence par Becker (1990).

En ce qui concerne la symptomatologie du dépérissement, il apparaît que, pour la majorité des sapins adultes étudiés, l'aspect clair des houppiers en 1986 ne correspondait pas en fait à un symptôme de dépérissement pathologique véritable lié à un problème nutritionnel, mais surtout à l'expression de l'ajustement « normal » des peuplements à de médiocres conditions d'alimentation en eau (cas de Russ et de Grendelbruch). Seuls les indices de transparence du houppier supérieurs à 30 % correspondent à des conditions de nutrition minérale vraiment déficiente (cas typique de Vologne), et c'est seulement pour les arbres correspondants que l'apport d'éléments minéraux a permis de renforcer l'évolution positive spontanée observée et de rétablir un équilibre rompu, en autorisant dans un premier temps la reconstitution d'une masse foliaire suffisante et, à terme, la reprise d'une croissance radiale satisfaisante.

L'explication de la difficulté d'interpréter clairement les comportements observés en 1988 relatifs à l'état des houppiers et de les relier à tel ou tel facteur environnemental est donnée par Bonneau (1991). La fertilisation n'a eu son plein effet sur le reverdissement et la refoliation qu'après 1988. Le pourcentage d'arbres dont les pertes foliaires ont augmenté après 1985, qui était assez élevé en 1988, est devenu extrêmement faible en 1990, que ce soit dans les placettes témoins ou dans les placettes fertilisées. On peut donc penser que les comportements de 1988, non confirmés deux ans plus tard, correspondaient en fait à une situation intermédiaire pour laquelle les traitements n'avaient pas encore eu le temps de s'exprimer d'une façon significative sur le reverdissement et/ou la refoliation.

Ces expériences permettent de tirer une conclusion importante sur les relations existant entre le dépérissement des sapinières et la fertilité de la station. Sur les stations pauvres, le dépérissement, lorsqu'il est très marqué, est effectivement lié à un phénomène de carence : il peut y être remédié par la fertilisation. En revanche, sur les stations les plus riches, le dépérissement — en général moins accentué que dans le cas précédent — n'est pas la conséquence d'une nutrition

déficiente, mais de la fréquence et de la durée des saisons sèches : la fertilisation est, dans ces conditions, moins efficace, et les peuplements se rétablissent d'eux-mêmes avec le retour de conditions météorologiques normales.

F. LEBOURGEOIS, M. BECKER
Unité d'Écophysiologie forestière
INRA - CENTRE DE NANCY
54280 CHAMPENOUX

M. BONNEAU
Unité de Microbiologie et Biogéochimie
des Écosystèmes forestiers
INRA - CENTRE DE NANCY
54280 CHAMPENOUX

BIBLIOGRAPHIE

- BECKER (M.). — Bilan de santé actuel et rétrospectif du Sapin (*Abies alba* Mill.) dans les Vosges. Étude écologique et dendrochronologique. — *Annales des Sciences forestières*, vol. 44, n° 4, 1987, pp. 379-402.
- BECKER (M.). — Le Dépérissement des forêts : importance du climat et de la sylviculture. — *Comptes rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, vol. 75, n° 9, 1989, pp. 117-124.
- BECKER (M.). — Radial growth of mature silver firs (*Abies alba* Mill.) fertilized in 1969. Interaction of climate and competition. In : Tree rings and environment, Proc. Intern. Dendrochronological Symposium, Ystad, Sweden, 3-9 sept. 1990. — *Lundqua Report*, 34, 1992, pp. 17-21.
- BECKER (M.), BONNEAU (M.), LE TACON (F.). — Long term vegetations changes in an *Abies alba* forest : natural development compared with response to fertilization. — *Journal of Vegetation Science*, 3, 1992, pp. 467-474.
- BONNEAU (M.). — Essais de fertilisation dans les Vosges. — Journées de travail DEFORPA, Palais des Congrès de Nancy, 1988, vol. 1, pp. 6.63-6.79.
- BONNEAU (M.). — Exploitation d'essais de fertilisation mis en place en 1985 dans les Vosges pour lutter contre le dépérissement des forêts. Compte rendu final. — Champenoux : INRA-CRF, 1991. — 12 p. + annexes.
- BONNEAU (M.), LANDMANN (G.). — Premiers effets de la fertilisation minérale sur la restauration de l'état de santé du sapin et de l'épicéa dans les Vosges. — Journée de travail DEFORPA. — Nancy : INRA-CRF, 1989, vol. 4, pp. 1-19.
- KEELING (C.D.). — Atmospheric CO₂ concentrations. Mauna Loa Observatory, Hawaii, 1958-1986. NDP-001/R1. — Oak Ridge (Tennessee) : Carbon dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge National Laboratory, 1986.
- KRAUSE (G.H.M.), ARNDT (U.), BRANDT (C.J.), BUCHER (J.), KENK (G.), MATZNER (E.). — Forest decline in Europe : development and possible causes. — *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 31, 1987, pp. 647-668.
- LANDMANN (G.), BONNEAU (M.), ADRIAN (M.). — Le Dépérissement du Sapin et de l'Épicéa commun dans le massif vosgien est-il en relation avec l'état nutritionnel des peuplements ? — *Revue forestière française*, vol. XXXIX, n° 1, 1987, pp. 5-11.
- LANDMANN (G.), BONNEAU (M.), ERLICH (I.). — Dépérissement des forêts et difficultés nutritionnelles dans le massif des Vosges. — Journées de travail DEFORPA, Palais des Congrès de Nancy, vol. 1, 1988.
- LEBOURGEOIS (F.). — Modifications observées à la suite d'une fertilisation dans diverses sapinières dépérisantes des Vosges. Étude phytocéologique et dendrochronologique. — Université d'Orsay, 1991. — 47 p. + annexes (Mémoire de DEA en Écologie générale et Production végétale).
- NEFTTEL (A.), MOOR (E.), OESCHGER (H.), STAUFFER (B.). — Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries. — *Nature*, n° 315, 1985, pp. 45-47.
- PICARD (J.-F.), BECKER (M.), LEBOURGEOIS (F.). — Modifications de la flore et de l'humus induites par un apport de calcium dans différents écosystèmes forestiers du Nord-Est de la France. Réunion sur les Amendements calcaires. — Nancy-Champenoux : INRA, 26 janv. 1993. — 10 p.
- PROBST (A.), DAMBRINE (E.), VIVILLE (E.), FRITZ (B.). — Influence of acid atmospheric inputs on surface water chemistry and mineral fluxes in a declining spruce stand within a small granitic catchment (Vosges massif, France). — *Journal of Hydrology*, vol. 116, 1990, pp. 101-124.
- TOUTAIN (F.), DIAGNE (A.), LE TACON (F.). — Effets d'apports d'éléments minéraux sur le fonctionnement d'un écosystème forestier dans l'Est de la France. — *Revue d'Écologie et de Biologie du Sol*, vol. 24, n° 3, 1987, pp. 283-300.
- TOUTAIN (F.), DIAGNE (A.), LE TACON (F.). — Possibilités de modification de type d'humus et d'amélioration de la fertilité des sols à moyen terme en hêtraie par apport d'éléments minéraux. — *Revue forestière française*, vol. XL, n° 2, 1988, pp. 99-107.
- ZECH (W.), POPP (E.). — Magnesiummangel, einer der Grunde für das Fichten und Tannensterben in N-O Bayern. — *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, vol. 102, 1983, pp. 50-55.
- ZÖTTL (H.W.), MIES (E.). — Die Fichtenerkrankung in Hochlagen des Südschwarz-waldes. — *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, vol. 154, n° 6/7, 1983, pp. 110-114.